

静的非線形解析手法を用いた下水道施設の耐震設計事例

日本水工設計株式会社 東京支社 伊藤 なつ音

これまで、経済的な耐震化事業の推進を目指し、静的非線形解析による構造検討の有効性を提案してきた。近年では非線形診断を採用する自治体が増え、一般的になりつつある状況である。本報告では、対象施設が有する様々な課題に対して、対象構造物の構造特性や変形機構を適切に把握・評価し、構造モデル変更も付加した静的非線形解析の導入による合理的な耐震性能向上策の検討により課題解決に結びついた事例を主に紹介する。

Key Words : 下水道施設の耐震診断、非線形解析、構造計算

1. 検討背景・目的

1.1 下水道施設の耐震基準について

下水道施設の耐震設計は、従来の L1 地震動（震度 5 弱～震度 5 強程度）の設計基準に加えて、1995 年の阪神淡路大震災を契機に設定された限界状態設計法による L2 地震動（震度 7 相当）への対応も求められるようになった。その後、2014 年の下水道施設の耐震指針の改定で、L2 地震動の設計手法に対して従来の「静的疑似非線形解析（疑似的に部材の損傷を前提として構造物の粘り強さ（じん性）を考慮した補正係数（構造物特性係数 C_s ）を設定する解析方法）に加えて既存施設の耐震診断や耐震補強設計に「静的非線形解析（プッシュオーバー解析）」を導入することが可能となった。

1.2 $C_s=1.0$ を用いた非線形解析導入効果の検討方法について

非線形解析での定量評価による提案を行う上で、構造物特性係数 C_s （部材のじん性を考慮した躯体が受け持つ地震エネルギーの割合）算定に時間を要すること、複合構造物では一貫計算プログラムを用いた立体モデルの検討も必要となるなど、非線形解析には時間と費用面での課題があった。そこで、当社における解析実績の統計から類似施設の C_s が 0.8～1.0 程度である点を考慮し、一定の安全性が考慮された設計に用いる地震エネルギーを躯体が最大で受け持つ条件となる $C_s=1.0$ による、非線形解析の提案を行ってきた。

このような提案を行っていく中で非線形解析の導入検討のみでは課題解決に至らない事例も見られた。以下に、検討事例の概要を示す。

表-1 非線形解析の提案実績

事例番号	事例	対象施設の概要	提案概要
①	A 市 K 水処理センターにおける Cs=1.0 による静的非線形解析導入効果の検討と LING 解消のためのモデル変更の提案	<ul style="list-style-type: none"> 水処理施設は開水路構造である。(臭気対策なし) 疑似非線形解析を用いた耐震診断を行った結果、L2 地震時の NG については非線形解析導入で補強量の削減効果が期待できる。 L1 地震時では増打ち補強が多く発生するため、能力不足の課題と、非線形解析を導入しても L1 地震時 NG の補強が多く残る。 	<p><課題>L1 地震時の NG が多い施設への対応</p> <p>L1 地震時 NG が多い施設は、従来非線形解析の効果が薄いと判断され、導入が行われる事例が少なかった。</p> <p><提案>従来は「非線形解析を導入すればせん断破壊モード NG が減少する傾向にある、L1 地震時での補強量が多いと設計費が高額な非線形解析導入効果が薄い」といった定性的な非線形導入効果の検討を行ってきた。しかし、構造特性や NG 発生要因を十分に分析すると L1 地震時 NG に有効な構造モデルの変更案が想定出来、モデル変更を行うことで非線形解析の導入効果がより得られるような提案を行うことが出来た。</p>
②	B 市 N 浄化センターにおける既耐震補強施設を含んだモデルを用いた Cs=1.0 による静的非線形解析導入効果の検討	<ul style="list-style-type: none"> 検討対象の水処理施設は 4 系列で 1 つの構造体となっている。 疑似非線形解析を用いた耐震診断結果で 4 系列中 1 系列を設備改築に併せて補強を行ったが、その後に指針改定が行われた。 疑似非線形解析を用いた耐震診断時の結果では、L2 地震時の NG については非線形解析導入で補強量の削減効果が期待できる。 非線形解析導入によって効果の確認を行いたいのは 4 系列ある施設のうち 1 系列であるが、補強済施設にも非線形解析の適用は必要となるため、非線形解析の導入で補強済箇所への影響が生じるかどうかの影響評価が必要。 	<p><課題>段階的な耐震化を行う中で、指針類の変更が行われた場合の対応</p> <p>段階的に耐震補強を進めている中で、既に補強工事が完了している施設 (1 系列) に対して非線形解析を導入した場合、補強済施設への NG が増えることがあるかが不明であった。</p> <p>非線形解析による耐震診断業務を行っても効果が得られるかは事例①同様に、従来の定性的な非線形診断の提案では、具体的にどの部材に NG が発生しているか等を検討していないため、補強済施設への影響を評価できない。</p> <p><提案></p> <p>構造計算による定量評価で、既設への影響を含めた事前評価を行い非線形解析の提案を行った。客先の非線形解析導入への不安を取り除いた状態での業務発注を可能とした。</p>

2.1 業務概要

K 水処理センターでは、既存設備の老朽化対策に合わせた土木躯体の耐震化を進めている。また、汚泥の共同化・広域化として 2 市 1 町のし尿等を受け入れる事業も進めており、し尿受入れ開始までに、既存水処理・汚泥処理施設のリニューアルと耐震化を行う事が、本処理場の当面の目標となっている。そのため、限られた期間および予算の中で効率的に事業を進める事が最重要課題であり、水処理施設の線形診断の結果から、当社は” 事業目標の達成の上では耐震補強量の削減が必要不可欠” であると考え、様々な提案を行った。本報告では、非線形解析手法では解決できない L1 地震時 NG への対応を中心に報告する。

2.2 施設概要

施設概要：最初沈殿池（躯体：8 池，供用中：4 系列で設備更新後も 4 系列のみで運転を行う）

計画 1 日最大汚水量 17,500m³/日,広域化・共同化事業開始時の水量予測値：14,300m³/日

構造形式：RC 造 直接基礎形式 構造分類：I-1 類

2.3 提案内容

2.3.1 本施設の課題

- ①本施設の耐震化については、水槽内に増打補強が多く発生するため、水槽容量が減少する。
- ②水槽内に発生した NG は L1 地震時の NG であるため、非線形解析の導入のみでは補強量が削減できない。

2.3.2 解決策の提案

開水路構造である水槽の上部にスラブを設け、側壁の変形を抑制するモデルに変更し、効果を検証する。検討対象施設は補助事業でスラブ設置可能な施設を選定し、能力評価は広域化・共同化事業開始時の水量予測値を用いて検討した。

①L1 地震動時の補強量削減策として、水槽上部に RC スラブを設置する架構モデルに変更策を提案した。

→線形解析結果から、既存の水槽の形状では底版と側壁が片持ち構造となっていることが原因で側壁下端・底版に L1 地震の NG が多く発生している状況であったため、スラブ設置での拘束効果（支点追加効果）による NG 解消効果を期待した。

②L2 地震動時の補強量削減策として、非線形解析の導入を提案

→現況のモデルと、スラブを設置したモデルの両方で非線形解析の導入効果を $C_s=1.0$ を用いた非線形解析による定量評価および比較検討により、レベル 1 地震時とレベル 2 地震時に関する総合的に最適となる対応方針の策定を行った。

2.3.3 L1 補強量削減提案：水処理施設 RC スラブ設置に伴うモデルの変更

(1) 検討対象：最初沈殿池、反応タンク各 1 断面

(2) 断面照査モデル

疑似非線形解析の耐震性能評価を行った際に鉄筋コンクリート増打補強が必要となる水路内の効果を確認するため、1 断面を選定した。

(3) モデル形状

最初沈殿池と反応タンクそれぞれの水槽上部にスラブを設置したモデルを作成した。

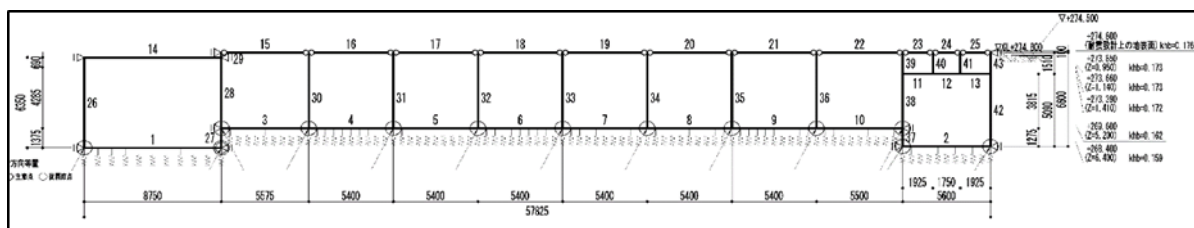
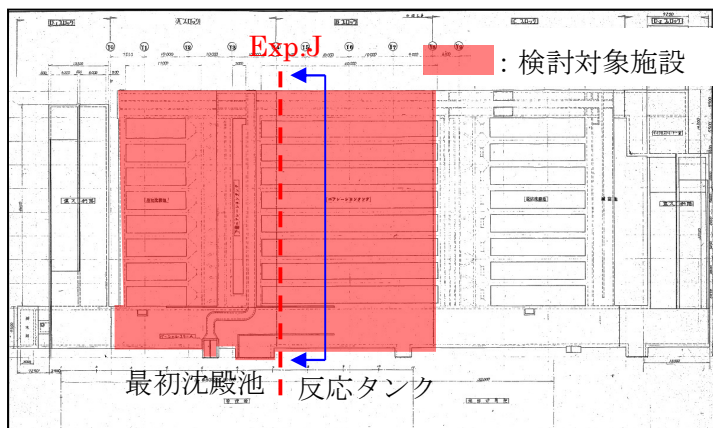


図-2 反応タンクスラブ設置モデル

(4) 検討結果

水槽内補強量を、最初沈殿池では約 68% 減少、反応タンクでは 100% 減少させることが出来、槽容量の減少も抑えられ、最初沈殿池については容量不足解消の効果が期待できる結果となった。また、反応タンクの底版 NG がなくなることで散気装置の設置高に伴う風量調整等の対応が不要となるなど処理機能面での効果も期待で

きる結果である。

表-2 水槽内補強量の比較 (L1 曲げ補強)

	スラブ設置無しモデル (現況) 補強後の容量減少 (m3)	スラブ設置モデル 補強後の容量減少 (m3)	モデル変更による 容量減少の差 (%)
最初沈殿池	164	52	-68.3
反応タンク	161	0	-100

表-3 容量不足解消効果の検討 (赤字：容量不足)

	広域化・共同化事業開始時 必要容量 (m3)	スラブ設置無しモデル (現況) 補強後の容量 (m3)	スラブ設置モデル 補強後の容量 (m3)
最初沈殿池	893.8	857	963
反応タンク	4766	6791	6952

(5) 現況モデル (スラブ設置無し) とスラブを設置モデルの照査結果の比較

スラブ設置無しモデルとスラブを設置したモデルを比較すると、スラブの設置により側壁の変形が抑えられたことで曲げモーメントの発生量が減少し、側壁の応力を伝達している底版の曲げモーメント NG の解消に大きな効果がみられたことが補強量減少に寄与したと考えられる。最初沈殿池も同様の傾向を示した。

2.3.4 L2 地震動時の静的非線形解析を導入効果の検討

L2NG の補強量減少効果を確認するため、線形診断時と同様のモデルを用いて $C_s=1.0$ による非線形の事前定量評価を行った。

- (1) **検討断面**: 水槽内や、管廊内等支障設備が多い箇所を導入効果も確認出来るよう選定した。
- (2) **検討結果**: 曲げモーメント NG は増加したが、せん断破壊モード NG の解消により全体補強量は約 90%削減出来た。このため、非線形解析の導入効果が十分にあることが確認出来た。以下 2 ケースについて耐震補強費の経済効果の比較を行い、ケース 2 が経済的となった。

ケース 1 「線形解析 (今回設計) の補強範囲で耐震化事業を進めた場合」
 ● ケース 2 「非線形解析を導入し、耐震化事業を進めた場合」

(3) 非線形導入の経済効果

非線形解析を導入した結果、耐震補強費を約 82%削減できる結果となった。

2.3.5 RC スラブ設置モデルを用いた非線形導入効果の検討

L1 補強量の削減提案において、RC スラブの設置による構造モデルの変更を行った。構造モデルを変更することで、当然ながら L2 非線形解析の結果にも影響が及ぶため、「RC スラブ設置モデル」を用いて「非線形解析」を行った場合、「補強範囲にどのような影響が生じるのか」の確認についても構造計算を行い、確認を行った。

- (1) **検討対象**: 最初沈殿池 1 断面、反応タンク 1 断面
- (2) **検討結果**: スラブ設置をしたモデルの方が、全体としてスラブ設置無しのモデルより L2 非線形解析の導入効果をより得ることが出来、大幅な補強量の減少効果を見込むことが出来た。スラブの設置で変形を抑制する効果が得られたことが要因で

あると考えられる。

2.4 提案の結論

結果として L1 補強量減少を目的として RC スラブを設置し、且つ L2 補強量を減少として非線形解析を行う方針が最も経済的であった。提案を行った結果、モデル変更を行う条件での非線形解析業務を行うことが決定した。本事例に関わらず開水路構造となっており 2 次元モデルにおいて剛床仮定が成立しない不安定構造で、L1 地震時での NG が多い施設に対して、本補強案は有効な対策であると考えられる。

ケース 1 : 「線形解析結果を用いて、耐震化事業を進める」

ケース 2 : 「線形解析で使用したモデルと同様のモデルを用いて非線形解析を行い、耐震化」

●ケース 3 : 「RC スラブを設置したモデルで非線形解析を導入し耐震化」

3. 設計事例②既耐震補強施設を含んだモデルを用いた $C_s=1.0$ による静的非線形解析導入効果の検討

3.1 事例の概要

(1) 施設概要

構造形式 : RC 造 杭基礎形式 構造分類 : IV-1 類

耐震化状況 : 縦管廊・3-1 系列が過年度に耐震補強実施済である。

3.2 提案内容

3.2.1 本施設の課題

N 浄化センターの耐震化事業を進めるにあたって、水処理施設 3-2 系の設備更新工事の時期に合わせて非線形解析を導入するか否かの判断が難しいことが課題であり、非線形解析の導入効果があるかの確認がしたいとの要望があった。

3.2.2 解決策の提案

「せん断破壊モード NG の解消効果が期待できる」といった定性的な非線形診断の提案では、具体的にどの部材に NG が発生しているか等の検討は実施していない為、補強済の縦管廊・3-1 系への影響を評価できない。そのため、構造計算を行い検討した。N 浄化センター水処理施設 3,4 系の検討断面を選定して、NG 減少傾向を確認した。

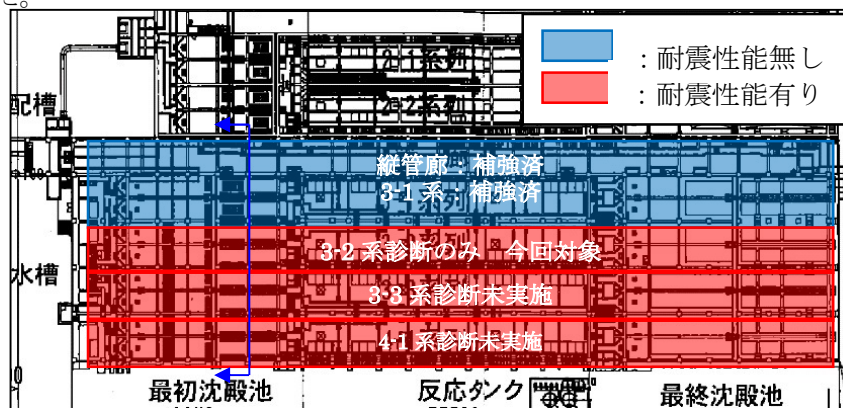


図-3 対象施設平面図

- (1) **検討対象施設**：疑似非線形解析結果で耐震補強工事にて鉄筋コンクリート増打ちを行った最初沈殿池、反応タンクの 1 断面ずつ解析を行う。
- (2) **断面照査モデル**：疑似非線形解析結果で耐震補強工事にて鉄筋コンクリート増打ちを行ったことでモデル変更が生じ、かつ非線形導入効果を確認できる断面を各施設 1 断面ずつ選定した。
- (3) **モデル形状**：最初沈殿池と反応タンクそれぞれ補強済の部材を断面形状に反映（鉄筋コンクリート増打ちを行う場合に断面を増打厚分増加させる）したモデルを作成した。

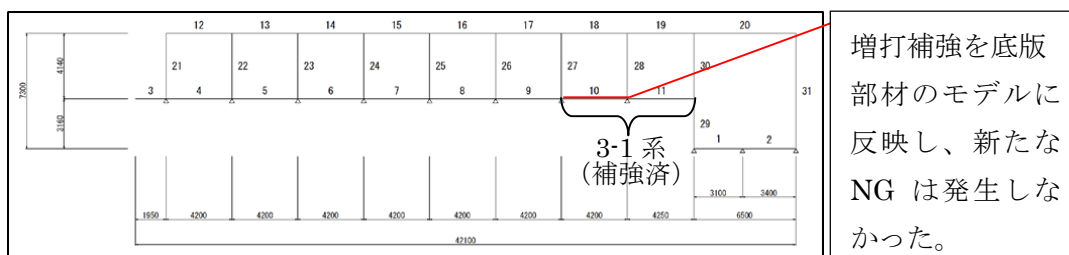


図-4 最初沈殿池断面モデル図

- (4) **検討結果**：非線形解析を行ったことで、補強済である 3-1 系で新たな補強が発生せずに 3-2 系に非線形導入効果が認められ、非線形解析による診断費用を見込んでも事業費を削減できる結果となった。

3.3 提案の結論

本事例のように剛接合で一体化した構造物については、構造物全体を同一手法で解析を行うことが必要となる。非線形解析を導入する際には、疑似非線形解析の結果で補強を行った箇所についても再照査が必要となることに留意する必要がある。

4. まとめ

- ・疑似非線形解析結果、非線形解析を導入し L2 地震時の補強量減少効果は期待できるが L1 地震時に補強が多く残ってしまう施設では、変形を抑制できるようなモデルの変更を行うことで L1 地震時の補強量を減少させる効果を得ることが出来た。
また、変更したモデルで非線形解析の導入効果の検証を行うことで L1、L2 地震時両方の補強量が減少し事業費の大幅な削減が可能であることを提案し、課題解決に結びつけた。
- ・一体構造物内で疑似非線形解析結果を用いて補強工事を行った箇所が存在する施設で非線形解析の導入効果の検討を行った。補強済箇所を考慮したモデルで非線形解析を導入しても L2 地震時の補強量減少かつ、補強済箇所への影響がないという提示を行うことで、課題解決に結びつけた。